

歪センサによる高温環境下配管内圧力監視技術に関する研究

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 白石 浩造
(株)四国総合研究所 産業応用技術部 高瀬 浩行

キーワード： 歪センサ
高温環境下
配管
圧力監視
見かけ歪
定着用治具
温度エージング

Key Words : Strain sensor
Under high temperature environment
Piping
Pressure monitoring
Apparent strain
Jig for the fixation
Temperature aging

Study on pressure monitoring technology in the piping under the high temperature environment using strain sensor

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department
Kozo Shiraishi, Hiroyuki Takase

Abstract

In the maintenance of nuclear power plants, it is important to accurately monitor the condition of the equipment under various environments. However, even heat-resistant pressure gauges may be difficult to monitor under the high temperature environments such as those above 100°C due to severe accidents. As a solution to this problem, pressure monitoring technology in the piping under the high temperature and the high pressure environment with high accuracy and for a long period of time was investigated by measuring electrical resistance strain using a strain sensor corresponding to high temperature.

An experimental apparatus was assembled to simulate the pressure monitoring (maximum 21MPa) in the primary coolant sampling pipe under the high temperature environment (maximum 190°C), and to use a strain sensor (heat resistant 250°C) of the adhesive type, which does not require any modification of the pipe by welding, etc. As a result, we confirmed that the pressure in the piping could be monitored with an accuracy of $\pm 2\%$, which is almost the same as that at room temperature, during a continuous test of about 2 hours by applying a jig for the fixation and an appropriate temperature aging method.

In the case of a severe accident, the pressure in the piping may need to be monitored under the high temperature environment for a long time. Therefore, we conducted long-term experiments under the high temperature environment of 190°C and the pressure in the pipe was maintained at 21 MPa. As a result, we confirmed that the pressure in the pipe can be monitored within 30 days with an accuracy of less than $\pm 20\%$.

1. はじめに

原子力発電所の設備保全において、様々な環境下における設備の状態を正確に監視することは重要である。しかし、過酷事故等による 100℃を超えるような特殊な高温環境下では、耐熱型の圧力計であっても圧力監視が困難となる可能性がある。このため、高温環境下においても配管内の圧力監視が可能となれば、過酷事故発生時等におけるプラント状態をより詳細に把握することが可能となる。

そこで、過酷事故等におけるプラント内部の状態を想定し、高温に対応した歪センサを使用した電気抵抗歪測定により、高温環境下の配管（一次冷却材系統配管等）内の圧力を高精度かつ長期間監視するための技術について検討を行った。

2. 電気抵抗歪測定の概要

2.1 電気抵抗歪測定の原理

歪センサの例を図 1 に示す。

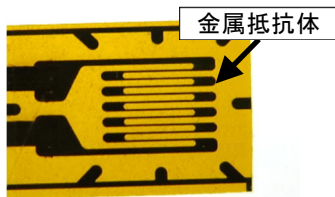


図 1 歪センサの例（箔ゲージ）

歪測定はその目的によって狭域範囲測定と広域範囲測定に分類される。電気抵抗歪測定は前者に属し、歪値 ε が 10^{-6} の分解能において動的・静的歪測定が可能、かつ安価で取扱いが容易である。そのため、最も広く使用されている歪測定方法である。測定は歪センサ（種類：箔ゲージ、半導体ゲージ、線ゲージ等）を被測定物の表面に専用接着剤または点溶接器にて設置することにより、被測定物に生じた歪は接着剤等の設置面を介して歪センサ内部の金属抵抗体（歪受感部）に伝わり、外部からの力（引張力、圧縮力）に対し、金属抵抗体の電気抵抗が変化（増加、減少）する。ここで、力が加わる前の金属抵抗体の電気抵抗値を R 、抵抗値変化を ΔR とすると、金属抵抗体に生じた歪値 ε は以下の関係式で表すことができる。

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \varepsilon \quad (1)$$

(K_s : 金属抵抗体材質による定数、ゲージ率)

式(1)における歪値 ε による抵抗値の変化分 ΔR は前述のように非常に微小であるため、図 2 に示すホイートストンブリッジ回路によって ΔR を電圧変化に変換することができる。

ここで、ホイートストンブリッジ回路における平衡状態時の各抵抗値を R_1, R_2, R_3, R_4 とし、その 1 辺 R_1 を歪センサ（1 ゲージ法）とした場合、ブリッジの印加電圧値を E とすると、被測定物に生じた歪値 ε に対して生じる出力電圧値 e_0 は以下の比例式で表される。

$$e_0 = \frac{1}{4} \cdot K_s \cdot \varepsilon \cdot E \quad (2)$$

(ホイートストンブリッジ回路、1 ゲージ法)

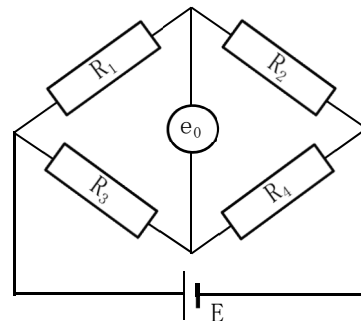


図 2 ホイートストンブリッジ回路

2.2 歪センサによる配管内圧力測定

配管内圧力 P により配管表面の周方向に生じる応力 σ を評価する式には通常薄肉円筒式と厚肉円筒式が用いられ、2 つの評価式は以下のように表すことができる¹⁾。

$$\text{薄肉円筒式 : } P = \frac{r_2 - r_1}{r_1} \sigma \quad (3)$$

$$\text{厚肉円筒式 : } P = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_1^2} \sigma \quad (4)$$

ここで、 r_1 （内径）、 r_2 （外径）は固定値であるため、式(3)、式(4)のいずれの場合も、配管内の圧力 P は配管表面の周方向応力 σ に比例することがわかる。したがって、配管周方向の応力 σ が測定できるように歪センサを設置することで、歪値 ε から配管内圧力 P が測定できる。

2.3 電気抵抗歪測定における問題点

被測定物に設置された歪センサは外力による歪が生じていない無負荷状態においても零点が変動（見かけ歪によるドリフトが発生）する場合がある。見かけ歪の要因の例を以下に示す。

- ・ 接着剤の硬化不足（接着不良）
- ・ 接着剤や歪センサの吸湿
- ・ 歪センサにおいて発生するジュール熱
- ・ 温度環境（100℃以上）

このため、歪を高精度に測定するには見かけ歪の要因を取り除く必要がある。特に、100℃以上の高温環境下に対応した歪センサは耐熱性を高めるため Cu-Ni や Ni-Cr、および Pt-W 等の合金が歪受感部材に使用されている。合金の特性上、温度による見かけ歪は $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ 程度であるため、ほとんど温度変動のない常温環境下では無視できるが、急激な温度上昇を伴う場合は見かけ歪の発生を無視できなくなる。このため、本実験における重要な課題は温度変動が激しい高温環境下での見かけ歪の除去手法にある。

3. 配管内圧力監視技術の検討

3.1 実験装置と圧力監視手順

図 3 に配管内圧力監視実験の状況を示す。これは高温環境下（最高 190℃）での一次冷却材サンプリング配管内の圧力（最高 21MPa）監視を模擬するために構築した実験装置であり、本装置では接着型の歪センサ（耐熱 250℃）を用いることで溶接等による配管改造が不要等の特徴を有する。

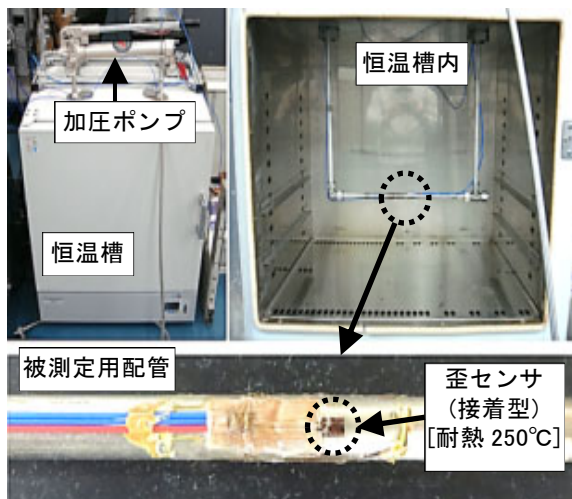


図 3 配管内圧力測定実験の状況

ここで、本装置を使用した実験における配管内の圧力測定では急激な温度変化による見かけ歪を取り除くため、以下の手順とした。

- ・ 恒温槽内（常温～190℃）に被測定用配管（一次冷却材サンプリング配管 SUS304 と同仕様）

を設置

- ・ 恒温槽上部の加圧ポンプにより配管内の水圧を調整（3～21MPa）
- ・ 配管表面に歪センサ（接着型）を設置
- ・ 配管の内部圧力、温度、表面歪データを採取
- ・ 事前に導出した圧力と歪、および温度と見かけ歪の関係式を用いて、測定した表面歪から見かけ歪を取り除いた後に圧力に換算

3.2 高精度歪測定のためのセンサの接着方法

高温接着型の歪センサは接着剤が完全に硬化するまで数時間連続して加熱する必要がある。この時、接着不良を防止し、かつ高精度な歪測定を実現するためには、加熱中に歪センサを均等に加圧（外側から締付固定）する処理方法が重要となる。そこで、図 4 に示す歪センサを均等に定着させるための治具を用いることとした。

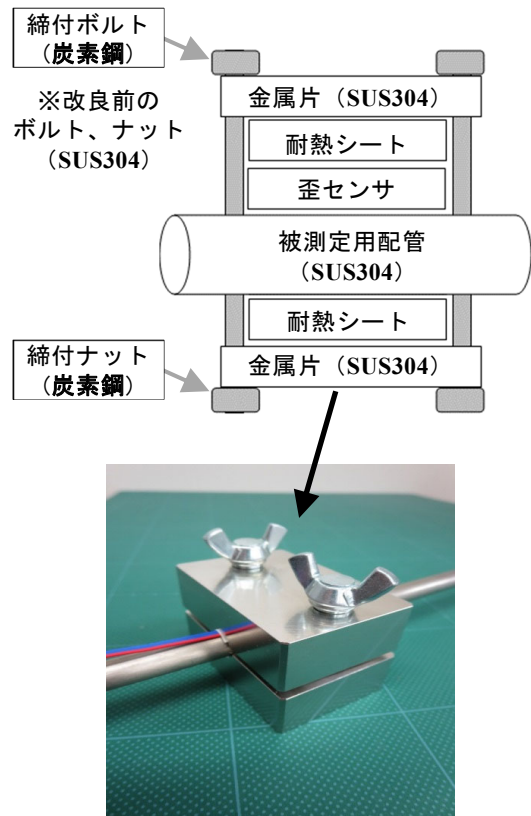


図 4 歪センサ定着用治具

当初は金属片、締付部ともに被測定用配管と同じ SUS304 としていたが、加熱後に締付部が緩むことによる接着不良が多発した。そこで、締付部の材質を SUS304（膨張係数： $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）

から炭素鋼（膨張係数： $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）に変更したところ、接着不良の発生率が約 60%から約 10%に減少することがわかった。

3.3 高精度歪測定のための温度エージング処理

3.2 項で述べた歪センサの接着を実施するとともに、3.1 項の圧力監視手順による様々な温度や圧力条件における配管内の圧力測定実験を行った結果、事前に温度エージング（歪センサや接着部を常温～190℃に曝す処理）を実施することで測定精度が大幅に向上することがわかった。

ただし、図 5 上に示すように温度エージング 1 回では温度変化時における圧力と歪との乖離幅が大きいことがわかった。そこで、図 6 に示すように温度エージングの回数と見かけ歪の関係を調査した結果、温度エージング回数が増加するほど温度と見かけ歪との関係が安定し、7～9 回実施したところで、ほぼ収束することがわかった。

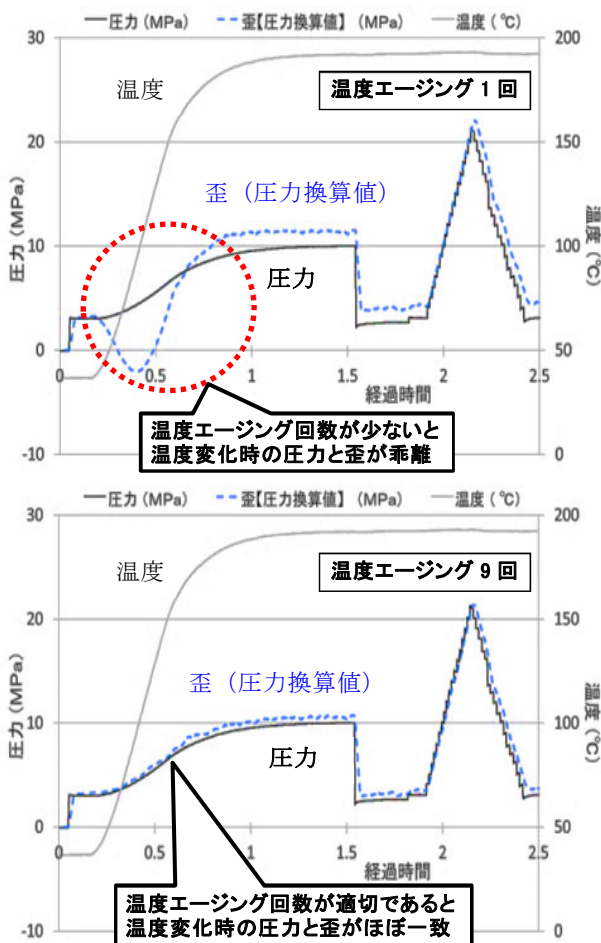


図 5 配管内圧力の連続測定実験（約 2 時間）

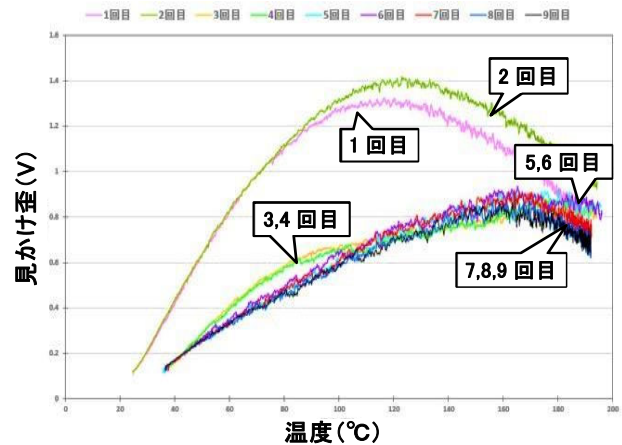


図 6 温度エージング回数に対する見かけ歪

その結果、図 5 下に示すように温度エージングを 9 回実施した場合には、圧力と歪（圧力換算値）がほぼ一致し、約 2 時間の連続試験において常温時とほぼ同じ $\pm 2\%$ の精度で配管内圧力が測定できることを確認した。

3.4 各温度、各歪値における圧力換算係数の確認

各温度や各歪の組合せにおいて見かけ歪除去後の圧力換算係数が変化すると仮定した場合、図 5 と異なる測定条件下では $\pm 2\%$ の測定精度が得られない可能性がある。そこで、各温度、各歪における配管内圧力を測定した結果を図 7 に示す。

同図より図 6 と同様に各温度に対して見かけ歪が発生するが、温度を固定した状態かつ見かけ歪（切片）を除去した後の歪と圧力は比例関係にあり、かつ比例定数（傾き）は温度にかかわらずほぼ一定であることがわかる。したがって、各温度や各歪の組合せにおける圧力換算係数は一定であり、図 5 と異なる測定条件下でも測定精度を低下させる要因とはならないことがわかった。

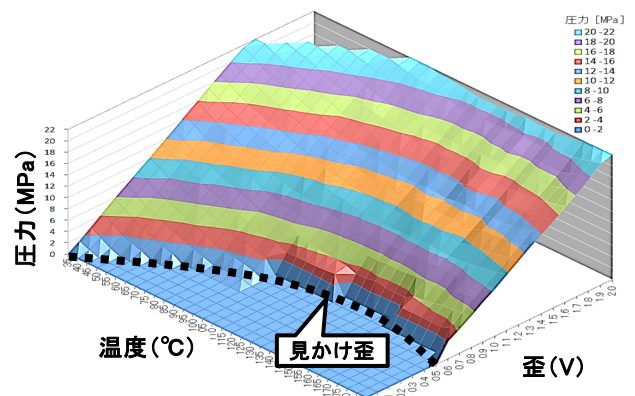


図 7 各温度、各歪における配管内圧力測定値

以上の結果からも、温度による見かけ歪の除去が歪センサによる配管内圧力測定精度において最も重要な要素であることが再確認できた。

3.5 歪センサによる配管内圧力の長期監視実験

過酷事故等が発生した場合、長期にわたって高温環境下における配管内圧力監視が必要になることが想定される。そこで、190℃の高温環境下かつ配管内圧力を 21MPa に維持した状態で長期監視実験を実施した結果を図 8 に示す。同図より、歪センサや接着部を高温環境下に長時間曝したことによる材質劣化等の影響と思われる測定誤差が徐々に増大するが、30 日以内であれば±20%未満の精度で配管内圧力を測定できることを確認した。

なお、高温環境下に長時間曝したことによる材質劣化等の影響については、温度エージングの適用時間や回数等を増加させることで、より安定化する可能性がある。このため、配管内圧力の長期監視が必要な場合については、最適な温度エージング方法や回数等についてさらなる検討を進める必要があると思われる。

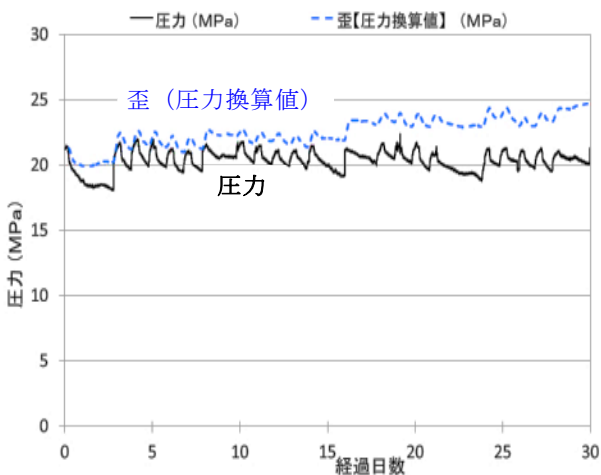


図 8 配管内圧力の長期監視結果
(190℃環境下で 30 日間監視)

4. 考察

本研究では高温に対応した歪センサにより、高温環境下において配管内圧力が高精度に測定できることを確認した。ただし、圧力測定の安定度や測定精度をさらに向上させるためには対象物や温度・圧力条件に応じた最適な固定方法の選定

や、最適な温度エージング方法や回数が重要であることを確認した。

特に、現場配管への歪センサ接着や、その後の温度エージングを実施する際には、配管ごと加熱する必要があるため、現場配管の効率的かつ安定的な加熱・保温方法についても検討を実施する必要がある。

また、歪センサについては高い耐放射線性を有することが一般的に知られているが、接着材質によっては放射線による劣化等が生じる可能性があるため、高放射線下における接着部を含めた歪の測定精度についても確認しておく必要があると思われる。

5. まとめ

本研究では過酷事故等による 100℃を超えるような高温環境下においても、高温に対応した歪センサを活用することにより、配管等を改造せずに配管内の圧力が長期間にわたって高精度に測定できることを確認した。

また、本検討結果は高温環境下に限らず適用できるため、プラント状態監視の多様化が期待でき、トラブルの未然防止やトラブル発生時における原因究明等にも役立つ可能性があると思われる。さらに、監視装置を簡便かつ安価に構築できることから、プラント監視の効率化やコスト低減が期待できる。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)原子力本部殿より委託を受け実施したものであり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 前川 晃、辻 峰史、高橋 常夫、加藤 稔：「配管表面ひずみを用いた管内圧力脈動の測定方法の考察」、INSS JOURNAL Vol.20 NT-3, pp.56-71, 2013